

## АКУСТИЧЕСКИЙ ГАЗОАНАЛИЗАТОР

© 2020 г. В. Н. Алферов<sup>a,\*</sup>, Д. А. Васильев<sup>a</sup><sup>a</sup> Институт физики высоких энергий им. А.А. Логанова Национального исследовательского центра

“Курчатовский институт”

Россия, 142281, Протвино Московской обл., пл. Науки, 1

\*e-mail: Vladimir.Alferov@ihep.ru

Поступила в редакцию 18.03.2020 г.

После доработки 03.04.2020 г.

Принята к публикации 06.04.2020 г.

Рассмотрены способы измерения состава бинарной газовой смеси с использованием зависимости скорости звука в газе от его молекулярного веса, в частности, с помощью акустического резонатора. Описаны разработанные на этом принципе в НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ датчик содержания водорода в атмосфере мишенной станции для циклотрона ускорителя С-70, обеспечивающего наработку медицинских изотопов, а также датчик содержания неона в гелии при его ожигении. Оптимизация характеристик резонатора позволила достигнуть разрешающей способности  $10^{-5}$ .

DOI: 10.31857/S0032816220050080

## ВВЕДЕНИЕ

При работе ускорителей и физических установок возникает необходимость высокоточных измерений состава двухкомпонентных газовых смесей, в том числе в непрерывном режиме. Появление в атмосфере нового газа может приводить к возбуждению нежелательного процесса. Источником сигнала о начале такого процесса в нашем случае служит датчик содержания водорода в атмосфере мишенной станции, разработанной в НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ для циклотрона С-70, обеспечивающего наработку медицинских изотопов [1]. Водород может появиться при разгерметизации мишени. Поэтому датчик должен обеспечивать непрерывные измерения и иметь высокую чувствительность, чтобы зафиксировать раннюю стадию развития опасной ситуации.

Помимо контроля появления водорода, необходимо измерять состав газообразного гелия перед его ожигением.

Используется несколько принципов измерения. Наиболее распространены измерения с применением промышленных приборов – оптических и электрохимических. Их привлекательность обусловлена возможностью как измерений в режиме реального времени, так и многокомпонентного анализа. Недостаток – низкая точность. Высокоточные приборы (не хуже  $10^{-4}$ ) относятся к классу лабораторных. Используемые принципы – спектрометрия, масс-спектрометрия. Спектрометрические измерения связаны, как правило, с отбо-

ром проб, применением поверочных газов. Эти приборы сложны и дороги.

В то же время измерение скорости звука в газе, зависящей от его молекулярного веса, может быть выполнено с высокой точностью с помощью акустических анализаторов, принцип действия которых основан на использовании указанной зависимости. Скорость звука  $v$  рассчитывается по следующей формуле

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}},$$

где  $\gamma = C_p/C_v$  – показатель адиабаты;  $C_p$  – теплоемкость газа при постоянном давлении;  $C_v = C_p - R$  – теплоемкость газа при постоянном объеме;  $M$  – молекулярная масса газа;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T, K$  – температура газа.

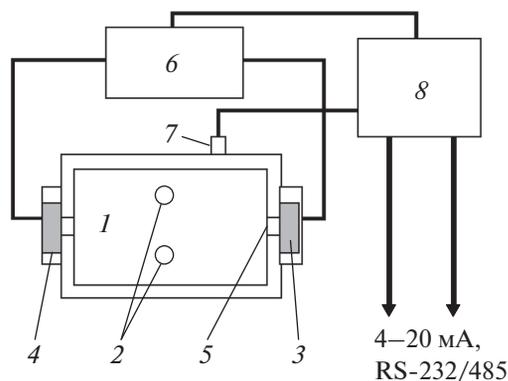
Если мы знаем молекулярный вес основного и примесного газов, то скорость звука в основном газе в присутствии примесного в первом приближении может быть представлена как

$$C_x = \sqrt{\frac{\gamma RT}{\chi M_{пр} + (1 - \chi) M_{осн}}},$$

где  $\chi$  – относительная концентрация примеси.

## КОНСТРУКЦИИ АНАЛИЗАТОРОВ

В первых акустических газоанализаторах скорость звука измерялась времяпролетным способом, описанным, например, в [2]. Эти устройства имели низкую точность измерения времени про-



**Рис. 1.** Блок-схема акустического анализатора. 1 – корпус резонатора; 2 – отверстия для конвекции; 3 – электродинамический излучатель; 4 – электретный микрофон; 5 – отверстия диаметром  $\sim 1$  мм; 6 – автогенератор; 7 – датчики температуры и влажности; 8 – контроллер.

хождения зондирующего импульса (единицы процентов), повысить которую можно было только увеличением их габаритов.

Применение акустического резонатора позволило повысить точность измерения за счет того, что измеряемой величиной стала частота звука.

Наибольшую точность обеспечили сферические резонаторы очень высокой добротности [3]. Они позволили довести точность измерения до  $10^{-6}$ .

Сложность изготовления сферы побудила использовать цилиндрический резонатор. Такой прибор описан в [4]. Камера резонатора в нем выполнена в виде отрезка трубы, ограниченной мембранами, либо в виде сосуда специальной формы, например, в виде резонатора Гельмгольца. Исследуемый газ подается специальным проточным устройством. Измеряемой величиной является также резонансная частота.

Такие газоанализаторы также имеют недостаточно высокую точность измерения, что обусловлено низкой добротностью резонатора из-за связи его с проточным устройством, влияния температуры, мембран и дисперсии фронта звуковой волны. Кроме того, газоанализатор на основе резонатора Гельмгольца затрудняет непрерывное измерение концентрации газа.

В [5] описан блок из двух цилиндрических резонаторов в едином алюминиевом корпусе для определения состава бинарной смеси  $^3\text{He}$ – $^4\text{He}$ , термостабилизированный в водяной ванне. Второй резонатор, заполненный  $^4\text{He}$ , использовался в качестве опорного для компенсации изменений температуры окружающей среды. Достигнута точность не хуже  $10^{-3}$ .

Обеспечить периодические измерения позволит прокачка газа через резонатор. Такой прибор разработан и используется в FNAL для контроля

утечек гелия в криогенной системе, обеспечивающей жидким гелием сверхпроводящие магниты Теватрона [6]. В приборе также используются в общем корпусе два резонатора. Через измерительный прокачивается исследуемый воздух, через опорный – воздух из той части помещения, где не должно быть гелия. Резонаторы включены в цепь обратной связи автогенераторов, измеряется разность фаз сигналов микрофонов. Резонаторы термостабилизируются нагревателем. Данные по точности не приводятся.

Нашей целью было разработать простой в изготовлении высокоточный датчик, не требующий прокачки газа и способный обеспечить непрерывные измерения различных комбинаций газов без корректировки “нуля” и чувствительности.

Такой датчик нужен, во-первых, как уже упоминалось, для обнаружения в атмосфере мишенной станции присутствия водорода, который может появиться при разгерметизации мишени. В связи с этим датчик должен обеспечивать непрерывные измерения и иметь высокую чувствительность, чтобы зафиксировать раннюю стадию развития аварии. Во-вторых, датчик необходим для измерения содержания неона в гелии, предназначенном для ожижения до сверхтекучести. Это важно для установок ожижения гелия, так как твердый неон забивает арматуру.

Применение акустического резонатора позволило решить эту задачу. Помимо этого, резонатор в качестве сенсора обладает двумя важными достоинствами: неизменностью во времени чувствительности и стабильностью “нуля”, т.е. частоты при измеряемой температуре в “нулевом” газе.

Прежде всего, было желательно избавиться от прокачки газа для сохранения высокой добротности. Нами предложен и запатентован полуволновой резонатор диаметром, немного меньшим длины, добротностью  $\sim 300$  на воздухе и диффузионным заполнением [7]. Его описание приведено ниже.

#### *Конструкция полуволнового резонатора*

Схематически резонатор показан на рис. 1. В варианте непрерывных измерений содержания известного примесного газа в атмосфере помещения датчик имеет отверстия 2 для диффузионного заполнения, расположенные в середине высоты в пучности скорости.

В варианте разовых измерений содержания неона в гелии использовался резонатор с одним входным отверстием, который после откачки последовательно заполнялся исследуемым и заведомо чистым гелием.

В датчике водорода применена предварительная калибровка резонатора в атмосфере чистого сухого воздуха в диапазоне требуемых температур.

На торцах резонатора (см. рис. 1) установлены электродинамический излучатель (3) НСО 905F и электретный микрофон (4) НМО 1003А, которые сообщаются с полостью резонатора через отверстия диаметром ~1 мм.

Излучатель НСО 905F имеет относительно плоскую частотную характеристику в диапазоне частот 4–5 кГц, и этот диапазон выбран рабочим и определяет длину резонатора.

Излучатель и микрофон включены в цепь обратной связи автогенератора на микросхеме 1561ГГ1. Автогенератор возбуждается на частоте около 5 кГц в атмосфере чистого сухого воздуха, частота измеряется один раз в секунду в течение 0.1 с в блоке измерения и управления программируемой логической интегральной схемы (п.л.и.с.) Altera EPM 7128 с помощью кварцевого генератора (счетная частота 1 МГц) и передается в контроллер на основе микросхемы ADuC 834. Частота кварцевого генератора регулярно проверяется подачей на измерительный канал опорной известной частоты от двоичного счетчика с кварцевым резонатором; корректный результат является признаком исправности п.л.и.с. и контроллера.

Для измерения температуры используется встроенный датчик в составе датчика влажности (см. ниже). В качестве резистора сравнения применяется высокостабильный резистор с малым температурным коэффициентом сопротивления. Датчики запитаны от двух отдельных бортовых источников тока 200 мкА.

Контроллер имеет интерфейсы RS-232 и RS-485 (4–20 мА) для связи с э.в.м. При превышении регулируемых порогов генерируются релейные предупредительный и аварийный сигналы.

В стабильных условиях по температуре и составу газа нестабильность показаний частоты не превышала  $10^{-5}$ , что позволило измерить содержание неона ( $\mu = 20.2$ ) в гелии ( $\mu = 4$ ) с погрешностью  $10^{-5}$ .

#### *Характеристики прибора*

На характеристики прибора влияют как внешние факторы, так и особенности конструкции. Кратко рассмотрим их.

**Зависимость частоты резонатора от температуры** измеряется в термокамере в атмосфере чистого сухого воздуха и записывается в энергонезависимой флэш-памяти прибора.

**Зависимость частоты резонатора от давления.** Согласно [8], зависимость скорости звука в воздухе от давления составляет примерно  $2 \cdot 10^{-3}$  атм/(м · с<sup>-1</sup>), по данным [9] —  $5 \cdot 10^{-4}$  атм/(м · с<sup>-1</sup>), а для водорода — примерно  $2 \cdot 10^{-3}$  атм/(м · с<sup>-1</sup>), т.е. обычные колебания атмосферного давления на точность измерений заметно не влияют.

#### **Зависимость частоты резонатора от влажности.**

Так как атмосфера помещений имеет переменную влажность, влияющую на скорость звука [10], осуществляется компенсация влажности. Для этого на внутренней стенке резонатора смонтирован датчик относительной влажности ННН-4602А фирмы Honeywell. Экспериментально измеряется изменение частоты резонатора в зависимости от относительной влажности при различных температурах. В энергонезависимой флэш-памяти прибора сохраняется трехмерная таблица при 14-ти значениях температуры от –40 до 60°С. По данным измерений с использованием интерполяционного многочлена 4-го порядка определяется поправка на влажность.

**Отверстия для конвекционного проникновения газа.** Число и суммарная площадь конвекционных отверстий влияют на результат измерений двояким образом. С одной стороны, увеличение площади обеспечивает скорейшее заполнение резонатора испытываемым газом. Время появления выходного сигнала (90%) в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52139-2003 (МЭК 61779-4-98) “Газоанализаторы и сигнализаторы горючих газов и паров электрические” не должно превышать 20 с. Это условие выполняется при наличии не менее четырех отверстий диаметром 3 мм. При наличии семи отверстий это время уменьшается до 10 с.

С другой стороны, через отверстия проникают сторонние шумы в полость резонатора. Особенно опасно возбуждение полости как резонатора Гельмгольца. Частота этих колебаний ниже резонансной частоты резонатора, однако увеличение площади отверстий сближает эти частоты. Так, при наличии десяти отверстий диаметром 3 мм резонанс наступает на частоте 1.2 кГц, при семи отверстиях того же диаметра — на частоте 0.8 кГц. При этом звуковой сигнал мощностью 90–95 дБ возбуждает колебания в микрофоне, сравнимые по амплитуде с рабочими. Вариант с семью отверстиями и был принят в качестве рабочего.

Активный фильтр верхних частот 4-го порядка в усилительном тракте после микрофона с частотой среза около 4 кГц подавляет резонансы от внешних шумов низких частот в режиме резонатора Гельмгольца и препятствует возбуждению резонансов низких частот, особенно около 3 кГц, вызванных неравномерностью амплитудно-частотной характеристики излучателя.

Внешний вид прибора приведен на рис. 2.

#### *Результаты испытаний*

Прибор испытывался на термостойкость, чувствительность к шумам, вибрации, а также на долговечность.



Рис. 2. Внешний вид газоанализатора.

О долговечности свидетельствует тот факт, что резонаторы, изготовленные в 2003–2010 гг., среди которых как периодически включаемые, так и неиспользованные, до сих пор работоспособны и сохраняют “ноль”.

Флуктуации частоты в стабильных условиях составляют примерно  $\pm 0.02$  Гц. В реальных условиях помещения они определяются флуктуациями температуры и влажности, суммарная нестабильность частоты составляет  $\pm 0.2$  Гц. Вклад в флуктуации “нуля” загазованности вносят, кроме того, неточность зависимости частоты от температуры в сухом воздухе и неточность трехмерной таблицы зависимости сдвига частоты от показаний датчика влажности и температуры. Суммарная нестабильность “нуля” загазованности составляет  $\pm 0.5$  Гц.

Для определения чувствительности и линейности датчик калибровался тремя поверочными газовыми смесями воздуха с водородом при содержании последнего: 0.5% (допустимое отклонение 0.04%), 1% и 2% объемных (допустимое отклонение 0.1%), а также в нулевой точке сухим воздухом. На рис. 3 приведены результаты, демонстрирующие достаточную линейность. Измеренная чувствительность по водороду составила 20 Гц/%, погрешность калибровки определялась в основном погрешностью состава поверочных газов и составляла  $\pm 0.1\%$ .

Таким образом, с учетом собственной погрешности “нуля”  $\pm 0.025\%$  общая погрешность измерения загазованности атмосферы водородом с калибровкой данными смесями может быть оценена как  $\pm 0.12\%$ . При необходимости погрешность может быть улучшена на порядок с помощью более точных приборов и поверочных газов. Потребляемая мощность 1.3 Вт.

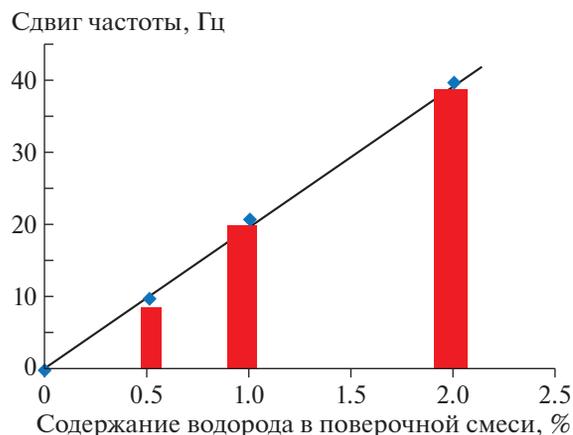


Рис. 3. Зависимость сдвига частоты резонатора от содержания водорода в поверочной смеси. Фоном показаны области погрешности состава смеси.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что полуволновой акустический резонатор с добротностью 200–300 и диффузионным заполнением позволяет измерять примесь газа к основному на уровне  $10^{-5}$ . Возможно измерение различных комбинаций газов в непрерывном режиме. Датчик исключительно прост в изготовлении, надежен, обеспечивает высокую стабильность нуля и чувствительности.

Разработан и изготовлен акустический датчик водорода для мишенной станции, разработанной в НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ для циклотрона ускорителя С-70, обеспечивающего наработку медицинских изотопов. Датчик обеспечивает непрерывный режим измерений и не нуждается в периодической проверке.

В режиме разовых измерений содержания неона в гелии прибор также обеспечивает точность  $10^{-5}$ .

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Соглашения о предоставлении субсидии 27 июня 2019 г. № 075.15.2019.1393, идентификатор Соглашения RFMEFI60717X0193.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Savitskaya E.N., Maslov M.A., Nikitin S.A., Peleshko V.N., Skvorodnev N.V. // Proc. the XXVI Russian Particle Accelerator Conference (RUPAC–2018). NRC KI–IHEP. Protvino, 01–05 октября 2018 г. WEPSB54. P. 391.
2. Григорьев Б.С., Меньшиков В.Г., Захаров И.Г. А.с. № 853520 СССР. МКИ G01N 29/00 // Опул. 07.08.1981.

3. *Keolian R., Garrett S., Naynard J., Rudnick I.* // Bull. of Amer. Phys. Soc. 1979. V. 24. P. 623.
4. *Новиков Л.В., Громов Ю.И., Семенов А.Г.* А.с. № 832447 СССР. МКИ G01N 29/00 // Оpubл. 23.05.1981.
5. *Polturak E., Garrett S.L., Lipson S.G.* // Rev. Sci. Instrum. 1986. V. 57. № 11. P. 2840.
6. *Bossert R.G.* and Fermilab. // Fermilab-Conf-05-642-AD. TRN: US0701347. Batavia, IL (United States): Fermi National Accelerator Lab. (FNAL), 2006.
7. *Алферов В.Н., Кренделев В.А., Ключников В.А.* Патент № 2142131 RU. МПК G01N 29/00 // Оpubл. 27.11. 1999.
8. Таблицы физических величин. Справочник / Под ред. акад. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.
9. Физический справочник.  
<https://tehtab.ru/Guide/GuidePhysics/>
10. *Harris C.M.* // J. Acoust. Soc. Am. 1971. V. 49. № 3. P. 890.  
<https://doi.org/10.1121/1.1912429>